



УДК 519.876.5

5.8. СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ВЕКТОРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ТИПА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

CREATION OF UNIVERSAL MODEL OF THE THREE-PHASE ELECTRIC MOTOR WITH VECTOR-ALGORITHMIC CONVERTER IN THE MATLAB SIMULINK

Стальная Мая Ивановна, канд. техн. наук, проф. кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, 656056, г. Барнаул, ул. Никитина, д. 59а, кв. 62. E-mail: vens-1@ya.ru, Тел. +79619900608

Еремочкин Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, 658080, Алтайский край, г. Новоалтайск, 8 микрорайон, д.1/2, кв. 322, E-mail: S.Eremochkin@yandex.ru, Тел. +79231669110

Maiya I. Stalnaya, Cand. Sc., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 656056, Nikitina street, 59a, r. 62, Barnaul, Russia. E-mail: vens-1@ya.ru. Ph.: +79619900608

Sergei Y. Eremochkin, Cand. Sc., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 658080, mikroraiyon 8, 1/2, r. 322, Novoaltaisk, Russia. E-mail: S.Eremochkin@yandex.ru. Ph.: +79231669110

Аннотация: в данной статье рассмотрен вопрос разработки компьютерной модели трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с преобразователем частоты векторно-алгоритмического типа. Модель реализована в программной среде MatLab Simulink.

Abstract: In this article the question of creation of a computer model of the three - phase asynchronous motor with vector-algorithmic frequency converter is considered. The model is realized in the MatLab Simulink program.

Ключевые слова: трехфазный двигатель, частотный преобразователь, моделирование, Matlab, Simulink, компьютерная модель.

Key words: three-phase motor, frequency converter, modeling, Matlab, Simulink, computer model.

В настоящее время, для управления асинхронными двигателями (АД) малой и средней мощности при отсутствии трехфазной сети используются различные преобразователи частоты с широким диапазоном регулирования скорости, питающиеся от однофазной сети переменного тока [1].

В ряде случаев, при решении задач автоматизации в сельском хозяйстве, применение таких преобразователей, отличающихся сложностью системы управления и большими эксплуатационными расходами, является не рациональным. Это обусловлено [2] спецификой сельскохозяйственного производства, где, во-первых, питающее напряжение не стабильно, а во-вторых, нет необходимости в широком диапазоне регулирования угловой скорости электропривода механизмов и также, в большинстве случаев, не требуется плавное регулирование этой скорости.

Поэтому желательно иметь простые частотные преобразователи, способные работать в условиях нестабильного напряжения питающей сети, с дискретным и небольшим диапазоном регулирования, имеющие невысокую стоимость.

В этом случае, альтернативой известным частотным преобразователям могут стать транзисторные преобразователи частоты, например [3, 4], векторно-алгоритмического типа, серия которых была разработана на кафедре «Электротехника и автоматизированный электропривод» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

При создании данных устройств остро встаёт проблема сокращения затрат на изготовление различных вариантов опытных образцов и их испытание. Неоценимую помощь в этом оказывает компьютерное моделирование. Важную роль, при этом, будет играть адекватная модель

АД, позволяющая имитировать питание обмоток АД от различных преобразователей частоты, имеющих, в том числе, и несинусоидальные выходные напряжения, а также при различных несимметричных напряжениях на каждой из статорных обмоток. На базе такой модели можно создать, так называемые виртуальные модели АД, которые в сочетании с моделями преобразовательных устройств позволяют проводить исследования и испытания, не уступающие по точности результатам опытно-экспериментальных исследований.

Обычно, для исследования работы асинхронного двигателя используются математические модели, уравнения которых записаны в двухфазной системе координат. Однако, известные модели [5, 6], позволяющие исследовать несимметричные режимы, достаточно объемны и трудно реализуются. В связи с вышесказанным, была разработана универсальная математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая рассчитывать статические и динамические режимы при несимметричном питающем напряжении.

Таким образом, если при моделировании асинхронного двигателя уравнения записать в естественной трехфазной системе координат, то взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора будут учитываться периодическими коэффициентами, которые изменяются по гармоническому закону при вращении ротора двигателя. Для перехода от периодических коэффициентов к постоянным, уравнения асинхронного двигателя описываются в заторможенной системе координат (α , β и γ), которая неподвижна относительно статорных осей. Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид [5, 7]:

$$\begin{cases} U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} \\ U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt} \\ U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt} \\ 0 = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c) \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \\ 0 = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a) \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \\ 0 = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b) \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (1)$$

где R_s , R_r – сопротивления фазы статора и ротора соответственно; U_A , U_B и U_C – фазные питающие напряжения; i_A , i_B , i_C , i_a , i_b , i_c – токи в фазах статора

и ротора; ω – частота вращения ротора; Ψ_A , Ψ_B и Ψ_C – потокосцепление фазы А, В и С соответственно.

Потокасцепление фазы А, например, может быть записано в виде:

$$\Psi_A = L_{SA} \cdot i_A - \frac{1}{2} L_m \cdot i_B - \frac{1}{2} L_m \cdot i_C - \frac{1}{2} L_m \cdot i_b - \frac{1}{2} L_m \cdot i_c + L_m \cdot i_a \quad (2)$$

где L_{SA} – индуктивность обмотки А статора.

Потокасцепления Ψ_B , Ψ_C , Ψ_a , Ψ_b , Ψ_c записываются аналогичным образом.

Подставляя потокасцепления в систему уравнений (1), получим шесть уравнений с шестью неизвестными: i_A , i_B , i_C , i_a , i_b , i_c . Для решения полученной системы численными методами необходимо привести её к нормальной форме Коши.

При этом, для модели АД с одним контуром на статоре и роторе, расположенными по одной оси, в трехфазной заторможенной системе координат система дифференциальных уравнений электрического равновесия контуров статора и ротора имеет вид [8, 9]:

$$\frac{d\bar{\Psi}}{dt} = -R \cdot \bar{i} + G + \bar{U} \quad (3)$$

где:

$$\bar{\Psi} = \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = L \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad \bar{i} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$G = -\frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Psi_b - \Psi_c \\ \Psi_c - \Psi_a \\ \Psi_a - \Psi_b \end{bmatrix} = H \times \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & M & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & L_s & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & M & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & L_s & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & M \\ M & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & L_r & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & M & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & L_r & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & M & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & L_r \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \omega & \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \omega \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \omega & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \omega \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \omega & \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \omega & 0 \end{bmatrix}$$

Примеч:

$$L_s = M + l\sigma_s;$$

$$L_r = M + l\sigma_r;$$

$$M = \frac{2}{3} L_m.$$

L_s и L_r – индуктивности обмоток статора и ротора соответственно;

L_m – взаимная индуктивность цепи намагничивания;

$l\sigma_s$ и $l\sigma_r$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора;

M – электромагнитный момент электродвигателя.

Тогда уравнение (3) в нормальной форме Коши имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} &= A \cdot \bar{\Psi} + \bar{U}; \\ \bar{i} &= B \cdot \bar{\Psi}, \end{aligned} \quad (7)$$

Нахождение A и B подробно описано в [8].

Зная токи во всех цепях статора и ротора, можно определить электромагнитный момент двигателя M :

$$M = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot J \cdot \left[(i_A \cdot i_c + i_B \cdot i_a + i_C \cdot i_b) - (i_A \cdot i_b + i_B \cdot i_c + i_C \cdot i_a) \right]$$

где p – число пар полюсов, J – момент инерции.

При этом уравнение движения асинхронного двигателя можно представить в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = (M - M_c) \cdot \frac{p}{J}, \quad (8)$$

где M_c – момент сопротивления на валу двигателя. Для создания модели, математические уравнения, описывающие процессы в асинхронном двигателе составляются из библиотечных блоков среды Simulink.

Уравнения, описывающие работу асинхронного двигателя, допускают их реализацию в виде блоков и подсистем Matlab Simulink.

Все подсистемы свернуты в один блок (рисунок 1), для которого задан список переменных (параметров асинхронного двигателя). Входные порты U_{1+} , U_{1-} , U_{2+} , U_{2-} , U_{3+} , U_{3-} соединяются с блоками-источниками напряжения; на вход M_c подается сигнал, соответствующий моменту сопротивления на валу двигателя. Сигнал может быть постоянной величины, либо изменяющимся по величине во времени, в зависимости от условий проводимых экспериментов. На выходах M_2 , W_{r1} , P_1 , P_2 , $\cos(\Phi_i)$, I во время моделирования формируются сигналы равные соответственно значениям электромагнитного момента на валу двигателя, угловой частоте вращения ротора, потребляемой из сети мощности, мощности на валу, коэффициента мощности и тока обмотки статора.

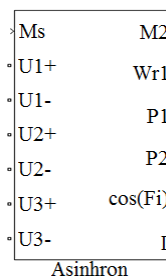


Рис. 1. Блок модели асинхронного двигателя

На рисунке 2 и 3 показаны механическая и рабочие характеристики электродвигателя 4AA56A4Y3, полученные с помощью разработанной модели при подключении к трехфазной сети, амплитуда которого равняется 311 В, частота 50 Гц, а сдвиг фаз 120 градусов.

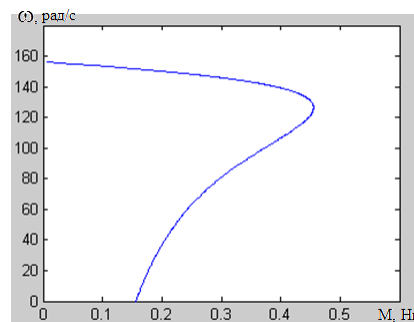


Рис. 2. Механическая характеристика двигателя, полученная на разработанной модели двигателя

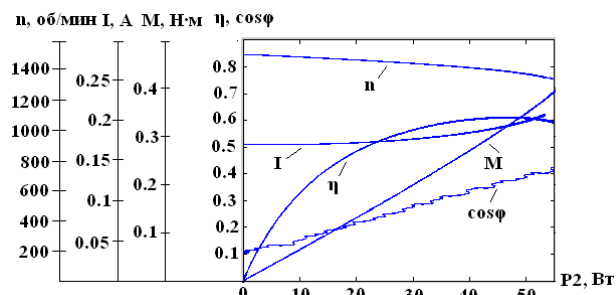


Рис. 3. Рабочие характеристики двигателя, полученные на разработанной модели

С целью проверки адекватности разработанной модели трехфазного асинхронного электродвигателя, были построены механическая (рисунок 4) и рабочие характеристики (рисунок 5) электродвигателя 4AA56A4Y3 на известной модели электродвигателя из библиотеки SimPowerSystems Matlab Simulink.

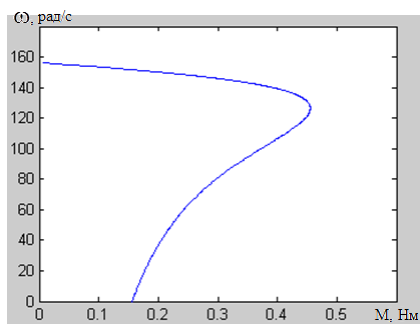


Рис. 4. Механическая характеристика двигателя, полученная на известной модели

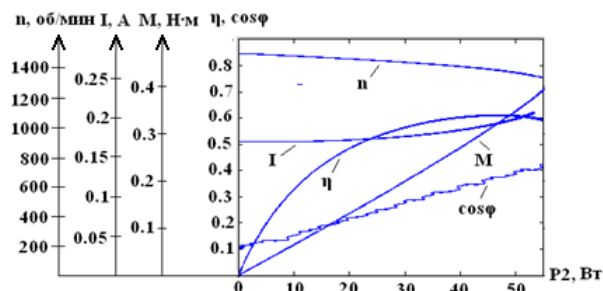


Рис. 5. Рабочие характеристики двигателя, полученные на известной модели

Из рисунков 1-5 видно, что полученные механические и рабочие характеристики двигателя, полученными с помощью разработанной модели, совпадают с механическими характеристиками электродвигателя, полученными ранее на известной модели электродвигателя, входящей в библиотеку SimPowerSystems Matlab Simulink. На

основании этого, можно сделать вывод о том, что разработанная модель асинхронного двигателя является адекватной и может с успехом использоваться для моделирования характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей при несимметричном питании статорных обмоток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терехов, В. М. Элементы автоматизированного электропривода / В. М. Терехов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 224 с.
2. Халина Т.М., Стальная М.И., Ерёмочкин С.Ю. Рациональное использование трёхфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей в отдалённых фермерских хозяйствах при однофазном электроснабжении // Электротехника. 2010. №10. С. 42-46.
3. Широкополосный трехфазный преобразователь частоты с явно выраженным звеном постоянного тока для питания трехфазного асинхронного электродвигателя: пат. 2482593 Рос. Федерация. № 2011152933/07; заявл. 23.12.2011; опубл. 20.07.2012.
4. Частотный регулятор скорости, ведомый сетью, для трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя: пат. 121975 Рос. Федерация. № 2012124220/07; заявл. 09.06.2012; опубл. 10.11.2012.
5. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] : учеб. пособие для вузов. / И. П. Копылов. — М.: Издательство «Высшая школа», 2001. — 327 с. : ил.
6. Мощинский Ю.А., Петров А.П., Математическая модель несимметричного асинхронного двигателя на основе схем замещения для переходных режимов // Электротехника. - 2003. - №2. - С. 24-30.
7. Баранов П.Р., Дементьев И.Г., Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным приводом тормозного устройства // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - №1. - С. 159-163.
8. Ле К. К. Разработка методов и средств компьютерного моделирования асинхронных двигателей с учётом динамики : диссертация ... кандидата технических наук : / К. К. Ле. — Москва, 2013. - 188 с. : ил.
9. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. — Екатеринбург. УРО РАН, 2000. — 254 с.